

# 基于 Dyson 同心光学系统的消色差 Féry 棱镜 高光谱成像仪的设计

杨 晋<sup>1,2</sup> 唐玉国<sup>1</sup> 巴音贺希格<sup>1</sup> 崔继承<sup>1,2</sup> 齐向东<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 为实现高光谱成像系统小型化、轻量化和高成像质量的要求,并使全工作波段具有更高的光学效率,提出以 Féry 棱镜组合作为分光元件的 Dyson 高光谱成像仪系统,系统中引入消色差棱镜组合以减小光谱的非线性色散,使棱镜系统色散的线性度达到较高。结果表明,可见-近红外(VNIR)光谱通道的光学调制传递函数(MTF)达到 0.9 以上,光谱分辨率为 4.2~6.8 nm。短波红外(SWIR)光谱通道的 MTF 达到 0.73~0.87,光谱分辨率为 6.4~12.5 nm。通过消色差 Féry 棱镜组合的设计,该光学成像系统两个光谱通道内的相对谱线弯曲均小于 0.05%,色畸变小于 0.13%。

**关键词** 光谱学;高光谱成像仪;Féry 棱镜;消色差棱镜;谱线弯曲;色畸变

**中图分类号** TH744.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1130003

## Design of Dyson Concentric Optical Hyperspectral Imaging System with Achromatized Féry Prism

Yang Jin<sup>1,2</sup> Tang Yuguo<sup>1</sup> Bayanheshig<sup>1</sup> Cui Jicheng<sup>1,2</sup> Qi Xiangdong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to achieve the requirements of miniaturization, light weight, high image quality of the hyperspectral imaging system, and improve the optical efficiency for the whole spectral range, the Dyson hyperspectral imaging system with achromatized Féry prism is presented. To decrease the nonlinear dispersion of spectrum, the achromatized prisms are introduced into the system. The optical modulation transfer function (MTF) for visible-near infrared (VNIR) spectral channel is higher than 0.9, and the spectral resolution is about 4.2~6.8 nm. The MTF for short-wave infrared (SWIR) spectral channel is 0.73~0.87, and the spectral resolution is about 6.4~12.5 nm. The achromatized Féry prisms correct the spectral-line bending and color distortion of the two hyperspectral imaging systems. Optical simulation shows that the distortion is less than 0.13% and the spectral bend is less than 0.05%.

**Key words** spectroscopy; hyperspectral imager; Féry prism; achromatized prism; spectral-line bending; color distortion

**OCIS codes** 110.4145; 110.4234; 230.5480

**收稿日期**: 2012-05-16; **收到修改稿日期**: 2012-06-18

**基金项目**: 国家自然科学基金(60478043)、国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2008-1)、中国科学院重大科研装备研制项目(YZ200804)、国家重大科学仪器设备开发专项项目(11YQ120023)和吉林省重大科技攻关项目(09ZDGG005)资助课题。

**作者简介**: 杨 晋(1988—),男,硕士研究生,主要从事分光系统光学设计方面的研究。

E-mail: yangjin@mail.ustc.edu.cn

**导师简介**: 唐玉国(1967—),男,博士,研究员,主要从事光谱仪器及医用光谱技术等方面的研究。

E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

# 1 引言

光谱成像仪是指既能对目标成像又可以测量目标光谱特性的光学遥感仪器。利用它可以在遥感平台上以高空间分辨率和高光谱分辨率获取物质光谱图像,即获取被观测区域(或物体)的表现图像信息及理化生物等物质构成光谱信息,是传统光谱分析技术(即定性、定量分析)向现代光谱分析技术(即定性、定量、定时、定位分析)发展的重要方向,这种前沿技术在军事侦察、资源勘查、自然灾害监控和环境污染评估和医学诊断治疗等诸多领域具有广阔的应用前景。

与一般的光谱遥感仪器相比,高光谱成像仪最显著特点是具有光谱范围宽、波段多和光谱分辨率高,其工作波长一般覆盖 400~2500 nm 太阳反射光谱区,波段达到纳米量级,波段数至少可达上百个。从 20 世纪 80 年代 Goetz 等<sup>[1]</sup>提出高光谱成像的概念之后的十多年间,高光谱成像技术得到蓬勃的发展,先后研制的高分辨率高光谱成像仪有美国 NASA 的 AVIRIS<sup>[2]</sup>、CASI<sup>[3]</sup>、AIS<sup>[4]</sup>、HYDICE<sup>[5]</sup>、意大利航天局的 PRISMA<sup>[6]</sup>等。它们所获得的图像数据在大气、陆地和海洋资源调查等方面得到广泛的应用。

随着军事和民用领域对高光谱图像需求的不断扩大,对高光谱成像仪的光谱分辨率和成像质量的要求也在不断提高。而小卫星及微小卫星技术的飞速发展,对有效载荷小型化和轻量化的要求也越来越高。高光谱成像仪也面临着相同的问题,实现小型化和轻量化以便适应多种平台的搭载。传统的准直光束中使用光栅或棱镜的光谱仪设计,难以降低体积和重量,且还存在谱线弯曲、像质不均匀等缺点。为了解决上述问题,从 19 世纪末至今,基于同心光学系统的高光谱成像仪,以其体积小、结构简单、像场平、色畸变小、像质好、高分辨率和无谱线弯曲等优点成为高光谱成像仪发展的主流。例如,NEMO 卫星上的 COIS<sup>[7]</sup>、EO-1 卫星上的 Hyperion<sup>[8]</sup>、英国小卫星上的 CHRIS<sup>[9]</sup>以及德国小卫星上的 EnMAP<sup>[10]</sup>等都是采用同心光学系统的高光谱成像仪。它们的工作波长一般在 400~1000 nm 或 400~2500 nm,具有上百个谱段,带宽为 5~20 nm。由于受探测器的限制,400~2500 nm 波段的高光谱成像仪一般由两个光谱通道组成,分别由可见-近红外(VNIR)和短波红外(SWIR)两个同心光学光谱成像系统组成<sup>[7,8,10]</sup>。其中以凸面光栅或凹面光栅作为同心光学系统色散元件的高光谱成像仪,由于光栅在实现

宽工作波段、高衍射效率方面困难较大,至今星载凸面或凹面光栅高光谱成像仪较少。因此,以棱镜作为同心光学系统色散元件的高光谱成像仪受到了关注,不仅取得了较好的研究进展<sup>[11]</sup>,而且也有成功的应用实例<sup>[9,10]</sup>。但是,以单一材料棱镜作为色散元件时,色散具有非常明显的非线性,增加了光谱定标的难度,而且光谱取样的非线性会严重影响光谱敏感度<sup>[11]</sup>。鉴于此,设计了一种以消色差 Féry 棱镜组合作为分光元件的 Dyson 同心光学系统,实现了宽波段、线性色散和高光学效率要求,而且比同类型 Offner 系统体积要小。

## 2 基础理论分析

### 2.1 Dyson 同心光学系统

Dyson<sup>[12]</sup>于 1959 年首次提出了一个以平凸透镜和凹面反射镜组成的简单但却可以显著抑制像差的系统。如图 1 所示, $r$  为平凸透镜中凸球面的曲率半径, $R$  为凹面反射镜的曲率半径,平凸透镜的凸面和凹面反射镜同心,凹面反射镜在透镜的焦点上,即满足

$$\frac{R}{r} = \frac{n}{n-1}, \quad (1)$$

式中  $n$  为透镜的折射率。可见,在 Dyson 系统中透镜的平面既是物面也是像面。物点都有相同的曲率中心,系统没有初级球差,同时系统还满足正弦条件,初级彗差也为零。光束两次通过 Dyson 系统中的平凸透镜,由(1)式可以推出系统的初级场曲系数为 0。物点发出的光束经过 Dyson 系统返回形成的像面,必然在物点与圆心形成的平面上,因此系统初级弧矢像差为 0。因为 Petzval 面为平面,近轴的子午像差也为零。同时,因为像面和物面的同心性,初级像散得到校正。显然,系统的初级畸变也为零。可见,Dyson 结构的特点是 Seidel 像差都趋于零,物、像平面和球心都在透镜平面附近,系统可以具有较大数值孔径。

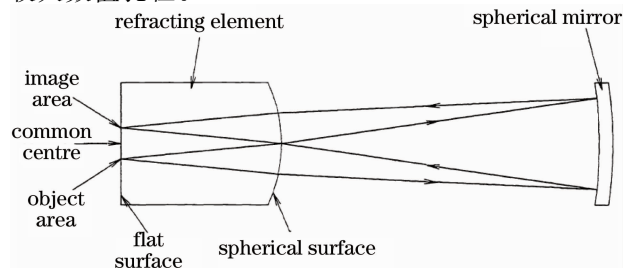


图 1 Dyson 同心光学系统

Fig. 1 Optical layout of Dyson system

Dyson 系统具有小型化、无像差和平像场的优点,其类似于自准直的结构,使系统更容易加入棱镜元件。自准直的结构更能确保光学系统复杂化后体积不会有明显的增加,更能保持小型化、轻量化的优点。

## 2.2 Féry 棱镜和消色差棱镜的原理

在发散或会聚光束中插入平面棱镜,必然会引入像差,当改变棱镜表面的曲率使其有别于传统平面时,引入的像差可以得到很好的校正。这种既起色散作用,又起聚焦作用的曲面棱镜的设计思想,早在 1911 年就由 Féry<sup>[13]</sup> 提出。

Féry 棱镜的结构如图 2 所示,这种棱镜由两个球面组成,受光面是折射面,底面背后镀有反射膜为反射面(聚焦面)。狭缝和焦点均处于同一圆周上,该圆周的直径为折射面的曲率半径。反射面的曲率中心也位于该圆周上。

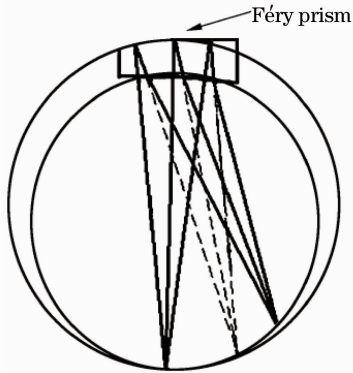


图 2 Féry 棱镜成像示意图

Fig. 2 Imaging sketch of Féry prism

色散的非线性,是棱镜色散的固有缺点,如英国 Sira 公司为欧空局小卫星 PROBA 研制的主要载荷 CHRIS,系统的光谱非线性较大,光谱分辨率不均匀,从短波(400 nm)的 1.25 nm 变化到长波(1000 nm)的 11 nm。单一材料棱镜的色散具有非常明显的非线性,虽然可以对这种非线性进行精细的光谱标定,但不同的光谱取样也严重影响光谱敏感度<sup>[11]</sup>。采用 Féry 棱镜的方法可以很好地抑制色散的非线性,但在 VNIR 波段采用单片 Féry 棱镜的方法将难以实现目标,而消色差棱镜组合可以把 VNIR 波段的非线性色散线性化到较好的程度,如图 3 所示,这种组合是由 56.3°顶角的石英棱镜和 17.5°顶角的火石棱镜构成。文献[12]中在 Offner 同心光学系统中插入 Féry 棱镜作为色散元件,SWIR 通道采用一种材料的棱镜,平均光谱带宽为 14.53 nm,900 nm 和 2450 nm 波长对应光谱带宽分别为 13.48 nm 和 9.60 nm,

VNIR 通道使用两种材料的棱镜,平均光谱带宽为 7.8 nm,420 nm 和 1000 nm 波长对应光谱带宽分别为 5.13 nm 和 10.12 nm,光谱色散非线性得到较好的控制。德国小卫星上的 EnMAP<sup>[10]</sup> 高光谱成像仪,也采用类似的设计,SWIR 通道和 VNIR 通道的平均光谱带宽分别为 10 nm 和 6.5 nm。

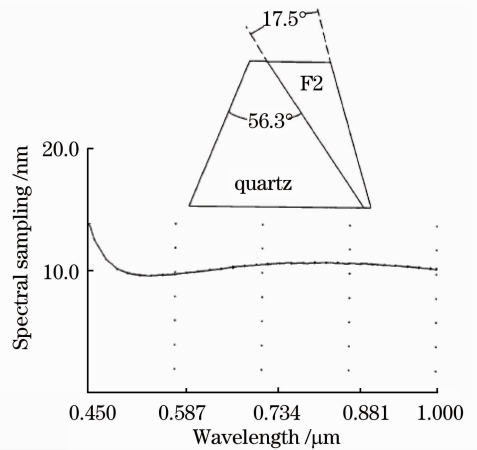


图 3 VNIR 波段的一种消色差棱镜组合

Fig. 3 A set of achromatized prisms for VNIR spectral range

## 3 新型高光谱成像仪的设计

光栅型 Dyson 光谱成像系统是把同心光学系统中的凹面反射镜用凹面光栅代替,保持了 Dyson 系统的优点,而且结构简单,易于实现较大数值孔径。目前,由于工艺和技术等的限制还无法制作宽光谱范围内保持较高衍射效率的凹面光栅和凸面光栅,全波段衍射效率一般在 15%~40%之间,使得以凸面光栅或凹面光栅作为色散元件的同心光学高光谱成像系统的发展受到限制。

棱镜作为色散元件只出现一个光谱级,不存在光栅色散的光谱级次相互重叠的问题,因此未受干扰的光谱范围可以很宽,并对整个光谱都具有很高的光通量,一般全波段都具有 60% 以上的光谱透射率。采用棱镜作为分光元件,可以避免上述以光栅作为色散元件带来的不足。但在一般情况下,棱镜色散具有很大的非线性,而且也同样存在着光栅色散时直入射狭缝的成像弯曲问题,图像弯曲的曲率半径与波长有关。采用消色差曲面棱镜可以在一定程度上消除上述问题。

### 3.1 VNIR 光谱通道高光谱成像系统的设计

图 4 为 VNIR 光谱通道高光谱成像系统的光学结构,表 1 为光学系统的设计参数,表中第一列括号内的面序列号为光线第二次通过同一面时的序列

号,采用两组消色差棱镜组合来消除 VNIR 波段的光谱非线性,同时增加光谱分辨率。系统的参数指标如下:

- 入射狭缝长度:12 mm;
- 物方数值孔径:0.16;
- 光谱范围:VNIR 波段 400~1040nm;
- 探测器像素尺寸:12  $\mu\text{m}$   $\times$  12  $\mu\text{m}$  的 CCD 面阵探测器;
- 光谱分辨率:长波光谱分辨率小于 6.8 nm,短波光谱分辨率小于 4.2 nm;

调制传递函数(MTF):全狭缝高范围内 MTF 大于 0.9;

光学尺寸:358 mm  $\times$  89 mm  $\times$  76 mm。

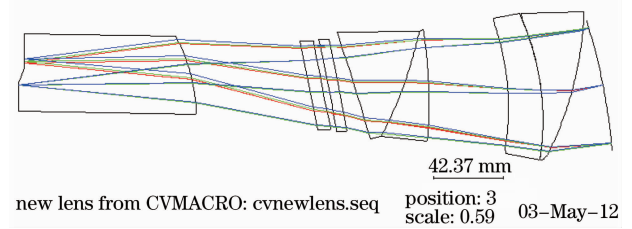


图 4 VNIR 光谱通道高光谱成像系统的光学结构图

Fig. 4 Optical layout of hyperspectral imager for VNIR channel

表 1 VNIR 光谱通道高光谱成像系统的设计参数

Table 1 Design parameters of hyperspectral imager for VNIR channel

| Surface serial number | Element | Radius in the y direction /mm | Material         | Thickness /mm |
|-----------------------|---------|-------------------------------|------------------|---------------|
| 1 (25)                | Prism   | Inf                           | SiO <sub>2</sub> | 105.93        |
| 2 (24)                |         | -104.99                       |                  | 70.62         |
| 3 (23)                | Len     | 776.92                        | PK50             | 7.94          |
| 4 (22)                |         | 1635.03                       |                  | 3.53          |
| 5 (21)                | Len     | -636.18                       | PK50             | 5.30          |
| 6 (20)                |         | 2449.78                       |                  | 9.71          |
| 7 (19)                | Prism   | -998.87                       | SiO <sub>2</sub> | 29.13         |
| 8 (18)                | Prism   | -231.45                       | F2               | 15.89         |
| 9 (17)                |         | -315.88                       |                  | 48.02         |
| 10 (16)               | Prism   | -177.20                       | F2               | 20.30         |
| 11 (15)               | Prism   | -14150                        | NLAK9            | 22.07         |
| 12 (14)               |         | -222.34                       |                  | 21.19         |
| 13                    | Mirror  | -374.40                       |                  |               |
| Image surface         | Inf     |                               |                  |               |

Dyson 系统采用等光程原理设计,任一条穿过系统的光线的光程都相等,可以很好地校正初级 Seidel 像差。但由于系统中采用平凸透镜,色散带来一定的高级像差。而在 Dyson 成像光谱仪系统中,插入色散棱镜后像差会进一步加大。采用一种等光程 Féry 棱镜<sup>[14]</sup>的设计方法,保持系统的等光程性。光线第一次通过棱镜产生负像散、正的彗差和畸变,当光线再次通过 Féry 棱镜后,产生与第一次符号相反的像差,只剩下很小的负像散。引入光线两次通过 Féry 棱镜,轴外剩余像差较小,轴上像差却被叠加,但当棱镜前后表面曲率半径相同时,像差达到最小值<sup>[15]</sup>。同时,通过改变 Féry 棱镜的曲率半径,可以校正直狭缝图像随波长弯曲的问题,并在系统中加入一对校正透镜,实现平像场。如图 5 所示,全波段的子午和弧矢像差都很小,满足平像场

的要求。各单色光在全狭缝范围内都保持较高的像质,MTF 到达 0.9 以上。波像差曲线如图 6 所示,全工作光谱波段的像差都得到较好的校正,系统的畸变小于 0.13%,光谱弯曲小于 8  $\mu\text{m}$ ,相对谱线弯曲均小于 0.05%,光学结构的复杂化使系统得到更优的像质,满足高光谱成像的要求。

在 VNIR 光谱通道,光谱色散具有更严重的非线性,故设计中引入两组消色差 Féry 棱镜组合,同时为像差校正提供更高的自由度。结果表明,长波 1040 nm 光谱分辨率小于 6.8 nm,中心波长 720 nm 光谱分辨率小于 6.1 nm,短波光谱分辨率小于 4.2 nm,整个光谱色散接近于线性,谱面色散为 2.23 mm,采用 12  $\mu\text{m}$   $\times$  12  $\mu\text{m}$  的 CCD 面阵探测器,谱段数达到 92 个,平均光谱带宽为 6.95 nm。

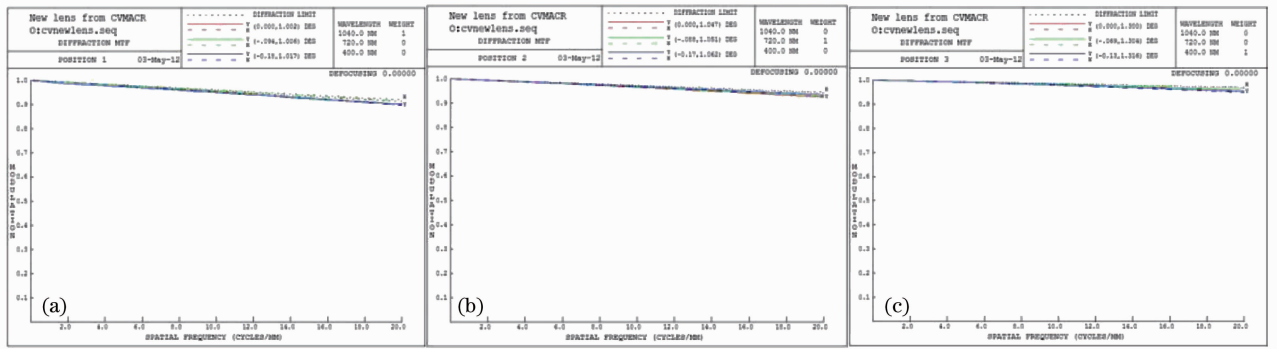


图 5 各波长在狭缝高为(a) 0 mm, (b) 3 mm, (c) 6 mm 时的调制传递函数

Fig. 5 MTF of different wavelengths with slit height (a) 0 mm, (b) 3 mm, (c) 6 mm

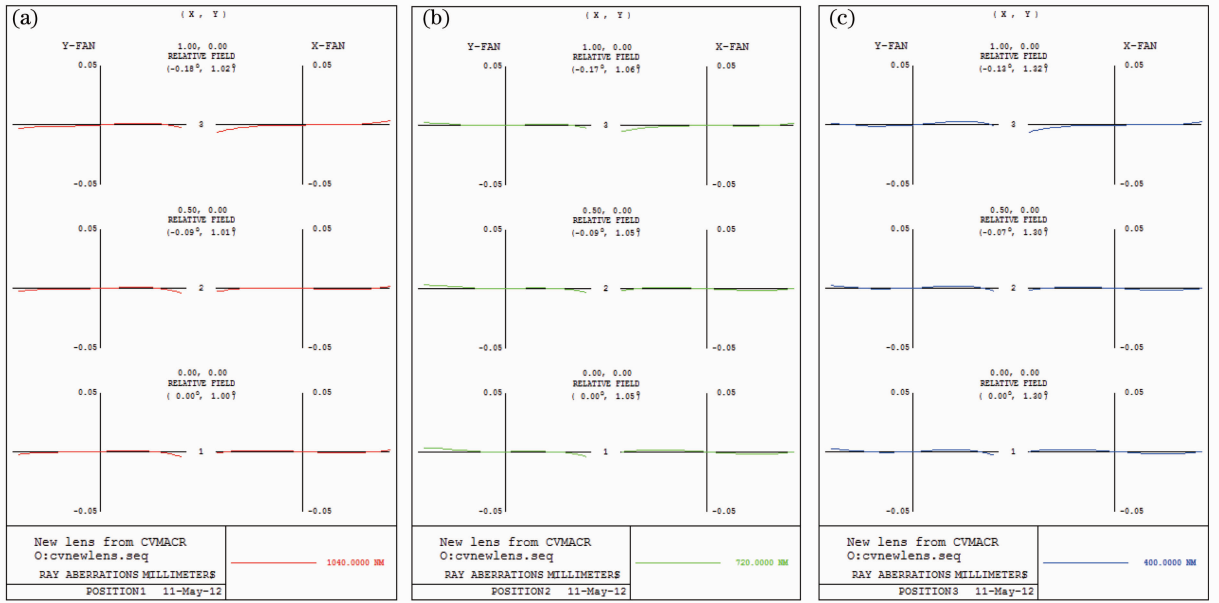


图 6 各波长在狭缝高为(a) 0 mm, (b) 3 mm, (c) 6 mm 时的像差曲线

Fig. 6 Optical aberration simulation of different wavelengths with slit height (a) 0 mm, (b) 3 mm, (c) 6 mm

### 3.2 SWIR 光谱通道高光谱成像系统的设计

图 7 为 SWIR 光谱通道高光谱成像系统的光学结构,表 2 为光学系统的设计参数,在 Dyson 系统中插入三片胶合的消色差 Féry 棱镜作为分光元件。系统的参数指标如下:

- 入射狭缝长度:12 mm;
- 物方数值孔径:0.16;
- 光谱范围:SWIR 波段 900~2500 nm;
- 探测器像素尺寸:25  $\mu\text{m}$   $\times$  25  $\mu\text{m}$  的 HgCdTe 面阵探测器;

光谱分辨率:长波光谱分辨率小于 6.4 nm,短波光谱分辨率小于 12.5 nm;

MTF:全狭缝高范围内大于 0.73,狭缝中心 MTF 都大于 0.81;

光学尺寸:386 mm  $\times$  118 mm  $\times$  82 mm。

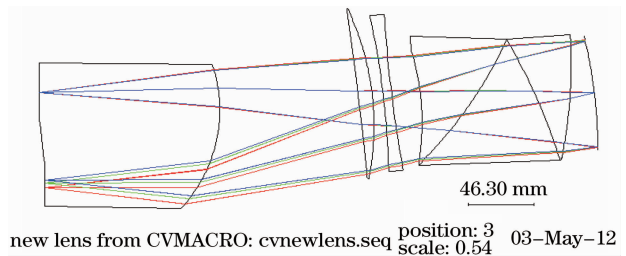


图 7 SWIR 光谱通道高光谱成像系统的光学结构图  
Fig. 7 Optical layout of hyperspectral imager for SWIR channel

SWIR 光谱通道的整体设计思路与 VNIR 光谱通道相同,Dyson 系统作为光学系统的前端和后端,利用其小像差、无谱线弯曲的优点来平衡系统整体像差,达到平像场的目的,通过 Féry 棱镜和在系统中加入一对校正透镜,平衡色散引入的非对称像差,并进一步平衡 Dyson 系统的高级轴外像差。如图 8

表 2 SWIR 光谱通道高光谱成像系统的设计参数  
Table 2 Design parameters of hyperspectral imager for SWIR channel

| Surface serial number | Element | Radius in the y direction /mm | Material         | Thickness /mm |
|-----------------------|---------|-------------------------------|------------------|---------------|
| 1 [21]                | Prism   | Inf                           | SiO <sub>2</sub> | 127.47        |
| 2 [20]                |         | -111.74                       |                  | 95.56         |
| 3 [19]                | Len     | -2804.63                      | PK50             | 9.85          |
| 4 [18]                |         | -226.66                       |                  | 7.88          |
| 5 [17]                | Len     | -625.88                       | PK50             | 5.91          |
| 6 [16]                |         | 1260.469                      |                  | 21.67         |
| 7 [15]                | Prism   | -214.72                       | SILICA           | 34.48         |
| 8 [14]                | Prism   | -329.04                       | PK51             | 54.18         |
| 9 [13]                | Prism   | -375.77                       | SILICA           | 23.64         |
| 10 [12]               |         | -381.17                       |                  | 17.34         |
| 11                    | Mirror  | -404.48                       |                  |               |
| Image surface         | Inf     |                               |                  |               |

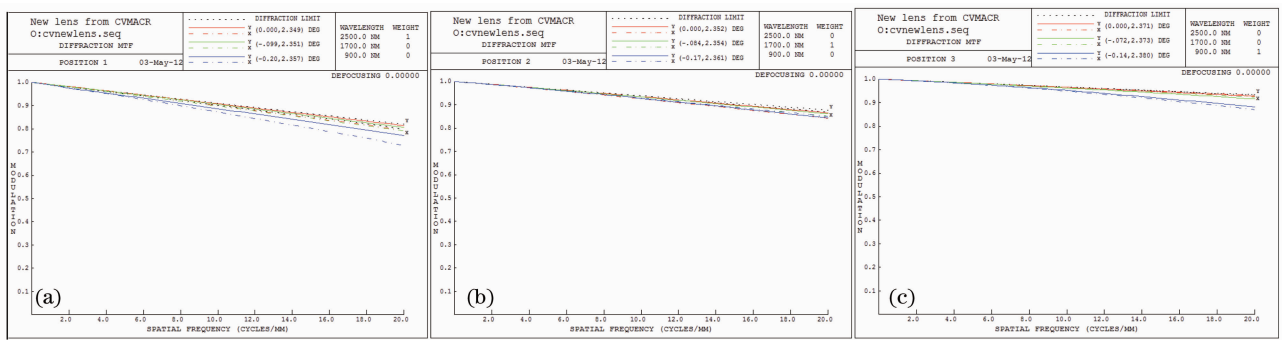


图 8 各波长在狭缝高为(a) 0 mm, (b) 3 mm, (c) 6 mm 时的调制传递函数  
Fig. 8 MTF of different wavelengths with slit height (a) 0 mm, (b) 3 mm, (c) 6 mm

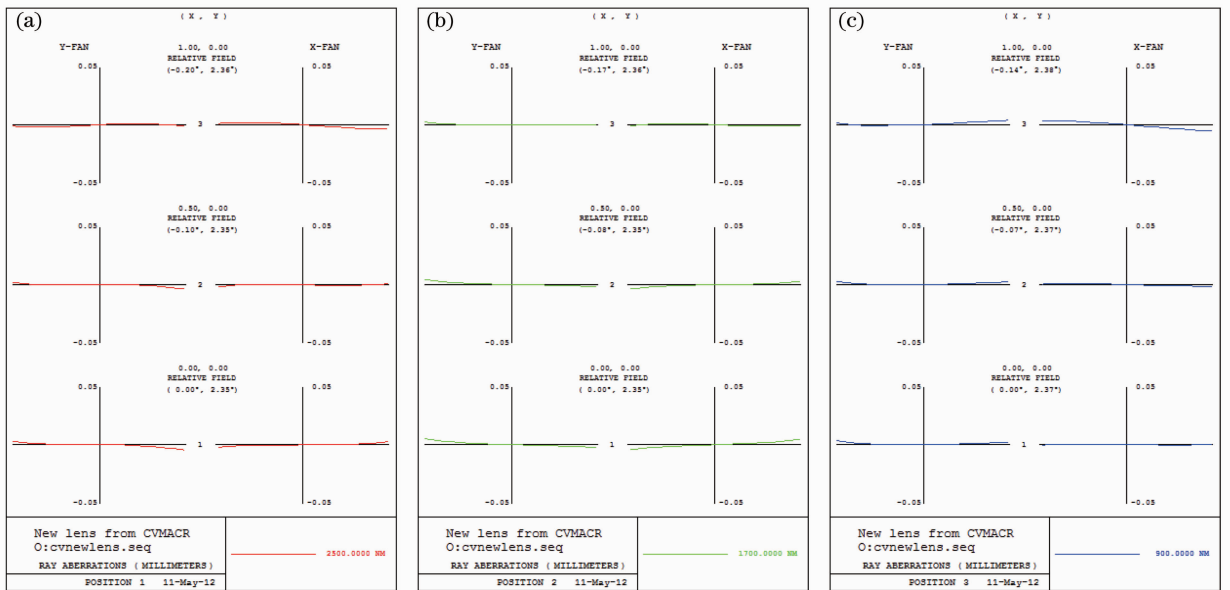


图 9 各波长在狭缝高为(a) 0 mm, (b) 3 mm, (c) 6 mm 时的像差曲线  
Fig. 9 Optical aberration simulation of different wavelengths with slit height (a) 0 mm, (b) 3 mm, (c) 6 mm

所示,各单色像差保持一致性,全波段范围内,不同狭缝高的子午方向像质均匀,弧矢像差也得到很好地校正,全狭缝范围内 MTF 达到 0.73~0.87,作为高光谱成像仪的分光系统有效地减小前端成像镜头设计的压力。由于 SWIR 光谱通道的棱镜色散的光谱非线性较小,在系统中只引入一组三片 Féry 棱镜构成的消色组合,长波光谱分辨率小于 6.4 nm,短波光谱分辨率小于 12.5 nm。谱面色散为 5.68 mm,采用  $25\ \mu\text{m}\times 25\ \mu\text{m}$  的 HgCdTe 面阵探测器,谱段数达到 114 个,平均光谱带宽为 11.1 nm。波像差曲线如图 9 所示,全工作光谱波段的单色像差都得到较好地校正并保持一致性,系统的畸变小于 0.08%,光谱弯曲小于  $5\ \mu\text{m}$ ,相对谱线弯曲均小于 0.02%。

## 4 结 论

为了解决曲面光栅对同心光学高光谱成像系统光学效率的限制,研究了一种在 Dyson 系统中分别插入消色差 Féry 棱镜的方法,抑制了棱镜色散的非线性,实现高光谱成像系统小型化、轻量化、高成像质量和高光学效率的要求。其中 SWIR 光谱通道高光谱成像系统长波光谱分辨率小于 6.2 nm,短波光谱分辨率小于 12.5 nm,MTF 达到 0.73~0.87。VNIR 光谱通道高光谱成像系统长波光谱分辨率小于 6.8 nm,短波光谱分辨率小于 4.2 nm,MTF 达到 0.9 以上。通过消色差 Féry 棱镜的方法校正了光谱成像的谱线弯曲和色畸变,两个光谱通道内的相对谱线弯曲均小于 0.05%,色畸变小于 0.13%,并使棱镜系统色散达到较高的线性度,在 400~2500 nm 工作波长范围内谱段数达到 206 个,能够满足高光谱成像仪的设计要求,具有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 A. F. H. Goetz, G. Vane, J. E. Solomon *et al.*. Imaging spectrometry for earth remote sensing [J]. *Science*, 1985, **228**(4704): 1147~1153
- 2 R. O. Green, T. G. Chruen, P. J. Nielson *et al.*. Airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS): recent improvements to the sensor and data facility[C]. *SPIE*, 1993, **1937**: 180~190
- 3 S. K. Babey, C. D. Anger. Compact airborne spectrographic imager (CASD): a progress review[C]. *SPIE*, 1937, **152**(1993): 152~163
- 4 B. M. Braam, J. T. Okkonen, M. Aikio *et al.*. Design and first test results of the Finnish airborne imaging spectrometer for different applications (AISA)[C]. *SPIE*, 1937, **142**(1993): 142~151
- 5 L. J. Rickard, R. W. basedow, E. F. Zalewski *et al.*. HYDICE: an airborne system for hyperspectral imaging [C]. *SPIE*, 1937, **173**(1993): 173~179
- 6 J. J. Puschell. Hyperspectral imagers for current and future mission[C]. *SPIE*, 2000, **4041**(121): 121~124
- 7 T. L. Wilson, C. O. Davis. Naval earth map observer (NEMO) satellite[C]. *SPIE*, 1999, **3753**: 2~11
- 8 M. A. Folkman, J. Pearlman, L. B. Liao *et al.*. EO-1/hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration[C]. *SPIE*, 2001, **4151**: 40~51
- 9 M. A. Cutter, D. R. Lobb, T. L. Williams *et al.*. Integration and testing of the compact high-resolution imaging spectrometer (CHRIS) [C]. *SPIE*, 1999, **3753**: 180~191
- 10 B. Sang, J. Schubert, S. Kaiser *et al.*. The EnMAP hyperspectral imaging spectrometer: instrument concept, calibration and technology [C]. *SPIE*, 2008, **7086**: 708615~708615
- 11 F. Blechinger, B. Harnisch, B. Kunkel. Optical concepts for high-resolution imaging spectrometers[C]. *SPIE*, 1995, **2480**: 165~179
- 12 J. Dyson. Unit magnification optical system without Seidel aberration[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1959, **49**(7): 713~716
- 13 C. Féry. A prism with curved faces, for spectrograph or spectroscope [J]. *The Astrophysics Journal*, 1911, **34**: 79~87
- 14 D. R. Lobb. Imaging spectrometers using concentric optics[C]. *SPIE*, 1997, **3118**: 339~347
- 15 Cheng Xin, Hong Yongfeng, Zhang Bao *et al.*. Design of compact Offner hyperspectral imaging system with Féry prism [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2010, **18**(8): 1773~1780  
程欣,洪永丰,张葆等.插入 Féry 棱镜的小型 Offner 超光谱成像系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(8): 1773~1780

栏目编辑: 韩 峰